

01

Teorías históricas del campo electromagnético

Breve historia de los fundamentos del electromagnetismo

El desarrollo del electromagnetismo ha sido un proceso lento desde hace casi tres siglos. Para explicar los experimentos, se puso a prueba también todo tipo de filosofías sobre la naturaleza.

Actualmente, prevalece una interpretación operativa de las ecuaciones de Maxwell, que se toman como la propia definición del campo electromagnético, considerándolas como una verdad indiscutible por el buen acuerdo de sus predicciones con los resultados experimentales. Sin embargo, se ha olvidado el largo proceso mental por el que se llegó a ellas, y lo que es más importante, los distintos significados que dieron al mundo los descubridores del electromagnetismo. Aún hoy en día es objeto de controversia cuál es el significado real del electromagnetismo. El que seamos capaces de predecir y calcular resultados experimentales no quiere decir que entendamos por qué las cosas son así. A continuación, se hace un resumen de las ideas y contribuciones de algunos de los principales pensadores e investigadores a la construcción de la actual teoría del campo electromagnético.

Galileo (1564-1642) afirmó que “el libro de la naturaleza” está escrito en lenguaje matemático. Fundó el método experimental, con lo que desterró muchos de los errores de la física aristotélica asumidos a través de los siglos por su supuesta autoridad. El razonamiento deductivo teórico y sus experimentos mentales, acompañado de la experimentación junto con un juicio crítico de su interpretación, fueron sus bases para establecer el método de progreso científico. Formuló el principio de inercia, por el que

Los significados del campo electromagnético

todo cuerpo sobre el que no actúa ninguna fuerza sigue una trayectoria rectilínea uniforme.

Derivado de éste, es el conocido principio de Galileo de que todos los sistemas que se mueven relativamente con velocidad constante son equivalentes y las ecuaciones de la física se expresan de la misma forma.

Entre sus descubrimientos se le atribuye el telescopio y las lunas de Júpiter, afirmando que los cuerpos celestes están constituidos de la misma materia que la Tierra.

Galileo fue el fundador del método experimental, y demostró mediante planos inclinados, que todos los cuerpos caen con la misma aceleración por la gravedad, y por tanto, todos los cuerpos independientemente de su masa llegan al suelo con al mismo tiempo. Esto se ha conocido como el principio de la unidad de la caída libre, o principio débil de equivalencia, que posteriormente fue reformulado por Einstein en su teoría general de la relatividad.

Sus observaciones experimentales se han refinado, y han sido el fundamento para lo que hoy se conoce como principio de la relatividad de Galileo, que establece la hipótesis de que todos sistemas en movimiento relativo son físicamente indistinguibles e equivalentes. El principio de equivalencia de la covarianza de Galileo establece que todas las leyes locales de la física tienen la misma forma en todos los sistemas sometidos a las transformaciones de Galileo.

Copérnico (1472-1543) introdujo el sistema heliocéntrico.

Bradley (1693-1762) midió la aberración estelar que es el diferente ángulo aparente con que llega la luz de las estrellas según la dirección de movimiento orbital de la tierra, estimando su valor máximo en 20,5 segundos de arco. Para explicar la aberración de la luz postuló la teoría del arrastre del éter. A lo largo de la historia se idearon diversas teorías del éter con propiedades distintas para justificar diferentes fenómenos ópticos, pero siempre tuvieron cada una de ellas unas limitaciones.

Snell (1580-1626) estableció las leyes de reflexión y refracción, que son la base de la óptica geométrica siguiendo un modelo de propagación mecanicista.

Fermat (1601-1665), abogado perspicaz, formuló el principio que lleva su nombre, de que la luz sigue el trayecto en el que menos tiempo invierte en recorrerlo, dando una justificación teórica de la ley de Snell para la reflexión y la refracción de la luz.

Descartes (1596-1650) fue el fundador de la geometría analítica, al establecer una correspondencia de la geometría espacial con el álgebra.

Supuso que la luz era una onda transmitida a través de un medio elástico perfecto llamado éter que llenaba todo el espacio, y que los diferentes colores se deben a vórtices con distintas velocidades en el éter. Dio la primera justificación del arco iris por reflexiones internas en una gota de agua.

Según Descartes, cuando los cuerpos se mueven, se forman unos remolinos en el espacio que interaccionan con otros por proximidad. La materia la identificaba con la extensión, y su ley fundamental es la conservación del momento (masa por velocidad), lo que le permitió formular las leyes de los choques entre cuerpos.

Consideraba la extensión como la propiedad esencial de la materia. Para Descartes, no existía el vacío y todas las interacciones se producían por proximidad por interacción mecánica, y no creía en las fuerzas, suponiendo que los vórtices del éter tenían suficientemente intensidad para empujar incluso la tierra alrededor del sol. Asumía que todo se movía por empuje, ya que consideraba los cuerpos impenetrables y que todo el espacio está lleno de materia o de vórtices del éter.

Fue un intelectualista en el sentido en que solo el razonamiento es suficiente para deducir las leyes de la naturaleza. Aunque suponía le existe de una dualidad mente cuerpo, concebía los animales como autómatas mecánicos.

Bacon (1561-1626) se le atribuye el ser el iniciador de la escuela empiricista, al afirmar que lo primero es observar y aprender de los hechos, que son los únicos que deben apoyar los razonamientos. Tuvo gran influencia en el área inglesa, y bajo sus principios se crearon instituciones de libre pensamiento orientadas a la experimentación.

Boyle (1627-1691) afirmó que la materia no ocupaba todo el espacio y que existía el vacío. La materia, según él, estaba formada de átomos de distinta forma que solo interaccionan por contacto en los choques, negando el concepto de fuerza. Fue el descubridor de las propiedades elásticas del aire, y de la correlación inversa entre la presión y volumen a temperatura constante del aire.

Huyghens (1629-1695) fue un defensor de las teorías ondulatorias de la luz con el descubrimiento de los fenómenos de interferencia y difracción, así como de la polarización de la luz. Suponía que la luz se propagaba en un éter lumínico mediante ondas longitudinales.

Newton (1643-1727) demostró con un prisma que la luz del sol estaba compuesta por un espectro igual al del arco iris. La propagación rectilínea de la luz le llevó a sostener que su naturaleza era corpuscular y a afirmar que estaba constituida por siete tipos de corpúsculos diferentes correspondientes a los siete

Los significados del campo electromagnético

colores del espectro. Debido a su prestigio y autoridad, esta opinión retrasó los avances de la óptica durante casi un siglo.

La teoría mecánica de Newton establece que la materia está formada por corpúsculos duros que actúan a distancia instantáneamente, con una intensidad que depende del inverso del cuadrado de la distancia. Esta teoría mecánica fue un gran logro que unificó campos antes independientes, como la mecánica, el sonido y la elasticidad de los sólidos. Sin embargo, la luz siguió siendo un campo independiente. Su teoría gravitatoria, aunque dio excelentes resultados al aplicarla a la astronomía, estaba basada en el controvertido concepto de acción a distancia instantánea. Sus teorías presuponen la existencia de un espacio y de un tiempo absoluto e independiente, en los que ocurren los sucesos físicos.

Afirmó también, que los animales se mueven por medio de una fuerza de electricidad. Los seguidores de Newton sostenían que existía una materia eléctrica y magnética diferente de la materia ordinaria. Afirmar también que había dos tipos de átomos magnéticos, norte y sur, que formaban las moléculas atómicas.

Newton introdujo la masa como una magnitud dinámica de carácter aditivo, que se conserva siempre en el tiempo, y que es la que determina la inercia de la materia. La masa es una propiedad extensiva intrínseca e inalterable de toda la materia. Postuló que el momento (masa*velocidad) y las fuerzas que originan la variación del momento, son las magnitudes fundamentales que determinan el movimiento de las partículas, aunque dichas fuerzas no siempre son bien conocidas.

Su teoría es de carácter atomista, ya que todos los cuerpos son considerados como un conjunto de partículas materiales con masa. Sin embargo, en su teoría considera que lo importante son las consecuencias de las interacciones, más que la propia naturaleza de la partículas y el origen de las interacciones, lo que condensó en su famosa sentencia: "Hypotheses non fingo".

Según Newton la fuerza solo depende de la distancia y no del estado de cambio o movimiento.

En sus Principia, compendió toda la mecánica en sus famosas tres leyes a partir de las cuales se puede deducir todas leyes del movimiento mecánicas por deducción racional, postulando que todo transcurre el escenario de un espacio y tiempo absolutos independientes:

1ª Ley de Newton: Principio de inercia de Galileo. Todo cuerpo continúa en su estado de reposo o de movimiento uniforme rectilíneo, excepto cuando una fuerza cambia su estado de movimiento.

Todos los cambios en la materia se deben a causas externas y el efecto de la causas se produce instantáneamente

2ª Ley de Newton: El cambio de movimiento (variación con el tiempo del momento) es proporcional a la fuerza impresa y tiene lugar en dirección de la recta en la cual la fuerza actúa.

3ª Ley de Newton: Principio de acción y reacción. Las fuerzas de la interacción de entre dos cuerpos son iguales y opuestas. Para cada fuerza de acción hay una fuerza de reacción igual y opuesta.

Con estas leyes se inició el desarrollo de la estática y la dinámica mediante el álgebra vectorial.

Leibniz (1646-1766) secundó una escuela alternativa basada en el concepto de campos. Afirmaba que las interacciones a distancia se producen a través de un substrato material no visible, y asume que los campos de fuerza existen incluso allí donde no hay materia, en contra de la escuela de Newton que sostenía que las fuerzas no podían existir en el vacío.

Afirmaba que el vacío no existe, basándose para ello en un principio de continuidad de que no puede haber cambios bruscos. Concebía el espacio sólo como un sistema de relaciones de situación entre cosas, y negaba la realidad de un espacio absoluto independiente de la materia. Consideraba que las fuerzas solo son debidas a un cambio de estas posiciones relativas, a diferencia de la escuela newtoniana que las consideraba como la variación de posición en espacio absoluto.

Consideraba que las fuerzas eran repulsivas para evitar la penetración de las mónadas, y que eran las responsables de mantener la integridad de los cuerpos y sus formas. Negaba la acción a distancia y los cambios de aceleración instantánea en los choques que según la teoría de Newton se producían.

Postuló que la vis viva, que corresponde a dos veces la actual energía cinética, es la propiedad característica de la materia, y que el movimiento como variación de la energía cinética se debe al trabajo de las fuerzas. Llegó a formular un rudimentario principio de la conservación de la energía, al afirmar la conservación total de la vis viva. Según Leibniz, la fuerza no puede ser destruida, ya que es la esencia de la materia. Incluso se atribuye a Leibniz un esquemático principio variacional, que afirma que la vis viva integrada a lo largo de la trayectoria real de una partícula toma su valor mínimo.

Sus teorías llevaron al desarrollo de la mecánica analítica y a la creación del importante concepto de energía potencial relacionado con el trabajo realizado por las fuerzas. Dio origen a una concepción de la mecánica es totalmente distinta de la de Newton, en que la energía cinética y la energía potencial son las dos magnitudes escalares que caracterizan toda la dinámica de un sistema de partículas en su conjunto.

Los significados del campo electromagnético

Las teorías de Leibniz, que se aproximan más a las actuales teorías de campos y de conservación de la energía, crearon una escuela antagonista a la de Newton y sus seguidores, que dio lugar a dos escuelas de pensamiento muy diferentes.

J. Bernoulli (1667-1748) formula una teoría en que el movimiento de una partícula en un campo de fuerzas es similar a la propagación de un rayo de luz en un medio óptico con índice de refracción variable. Es el precursor del principio de mínima acción de Hamilton, demostrando que una partícula sigue una trayectoria en que la integral de la energía cinética es mínima, estableciendo una analogía con el principio óptico de Fermat, que sería posteriormente generalizado por Jacobi (1804-1851), estableciendo una dualidad entre los fenómenos mecánicos y las ondas en óptica, que serían la base para el desarrollo de la mecánica cuántica ondulatoria de Schrödinger (1887-1961).

Maupertuis (1698-1759) sugirió que todos los cambios en la naturaleza ocurren de forma que el producto del espacio recorrido por la acción (lo que actualmente se llama velocidad) toma siempre el menor valor posible.

La extrapolación de su principio no solo a los cuerpos materiales sino también a cualquier objeto incluso los seres vivos, lo dotó de un carácter metafísico teológico. Sin embargo los principios de Fermat y Maupertuis fueron reformulados posteriormente de forma rigurosa por Lagrange y Euler mediante el cálculo de variaciones, y por Hamilton en su principio de mínima acción.

Du Fay (1698-1793) descubrió que existen dos tipos de electricidad, una positiva y otra negativa, de forma que las del mismo signo se repelen y las de distinto signo se atraen.

Boscovich (1711-1787) combinó las ideas de Leibniz de que toda la materia es fuerza, con las de Newton sobre los corpúsculos y el espacio vacío, y afirmó que la materia está formada por átomos puntuales dotados de fuerzas repulsivas en la proximidad y atractivas a distancia. Sus teorías influyeron en la creación del concepto de campo.

Kant (1724-1804) adoptó la idea de Leibniz de que las partículas estaban llenas de fuerzas. Llegó a la conclusión de que los átomos tienen que ser elásticos, para así evitar fuerzas repulsivas infinitas en las colisiones. Kant también fue el primero que formuló la hipótesis de la existencia de las galaxias como una agrupación de estrellas.

Galvani (1737-1798), siguiendo las ideas de Newton de que los animales se mueven mediante una fuerza de electricidad, experimentó que las patas de una rana

disecionada saltaban cuando se tocaba la médula con dos piezas de metal diferentes, e identificó la fuerza vital con la electricidad animal.

Volta (1745-1827) se dio cuenta de que las conclusiones de Galvani eran erróneas y, colocando las mismas piezas en una disolución ácida, comprobó experimentalmente que se podían producir corrientes eléctricas por reacciones químicas, y que existía una conversión entre la fuerza eléctrica y la química. Fue el inventor de la batería eléctrica.

Lavoisier (1743-1794) y **Dalton** (1766-1844) formularon las leyes de la conservación de la masa y de las proporciones en las reacciones químicas, basándose en sus experimentos y la teoría atómica.

B. Thomson (1753-1814) en base a la teoría atómica, afirmó que el calor era una medida del movimiento de los átomos, en contra de la teoría vigente de que el calor era un fluido denominado flogisto.

Coulomb (1736-1806) comprobó experimentalmente la teoría de **Priestley** (1733-1806) de que los cuerpos cargados se atraen o repelen con la ley del inverso del cuadrado de la distancia. Suponía que por los conductores circulaban unos fluidos positivos y negativos, y la carga era asociada a un exceso de uno de los fluidos. Trató de demostrar experimentalmente una teoría newtoniana del magnetismo, partiendo de dos fluidos magnéticos y considerando que dichos fluidos se separan en la imantación. Consideraba que existían unos átomos eléctricos y otros diferentes magnéticos al manifestarse sus fuerzas solo en determinados materiales, a diferencia de la materia ordinaria que se atrae de forma universal con la fuerza de la gravedad.

Oersted (1777-1851) afirmaba que materia podía interactuar con diferentes tipos de fuerza, y suponía que todas las fuerzas conocidas, como las eléctricas, magnéticas, de cohesión y gravitación, son manifestaciones de sólo dos fuerzas fundamentales, y que también podían convertirse unas en otras. Esto constituyó una importante corriente antinewtoniana que, a través de Oersted y Faraday, se prolongó hasta nuestros días con las teorías de unificación de campos. Oersted descubrió que una corriente eléctrica producía un campo magnético, el cual actuaba sobre la aguja imantada de una brújula rotándola perpendicularmente a la corriente, interpretándolo como un nuevo tipo de fuerza que no podía ser explicada por la teoría mecánica de Newton, en que las fuerzas son de tirar o empujar y no pueden conectarse y desconectarse.

Esto confirmó su teoría del intercambio y creación de las fuerzas, que era negada inicialmente por lo newtonianos que afirmaban que cada fuerza tenía que tener un

Los significados del campo electromagnético

átomo distinto. Sin embargo, la comprobación de la transformación del magnetismo en electricidad tuvo que esperar hasta Faraday.

Davy (1777-1829) propuso la idea de la naturaleza eléctrica de los enlaces químicos, después de que Nicholson y Carlisle demostraran que una disolución ácida en contacto con una batería se disociaba en moléculas de oxígeno e hidrógeno.

Esto confirmó las ideas de Leibniz y Oersted de que el substrato de la materia son las fuerzas, y la misma materia se puede manifestar con varios tipos de fuerzas que se podían transformar entre ellas.

Euler (1707-1783) y **Lagrange** (1736-1813) crearon la mecánica analítica y demostraron que el principio de Fermat tenía una fundamentación basada en principios variacionales de la mecánica.

Laplace (1749-1827) y **Poisson** (1781-1840) formularon matemáticamente las teorías de Coulomb introduciendo los conceptos de potencial y campo, aunque los consideraban solamente una herramienta matemática intermedia para calcular las interacciones entre cargas, que suponían eran instantáneas.

Laplace junto con Lagrange también demostraron analíticamente que la cantidad de movimiento y la energía de un sistema mecánico aislado se mantienen constantes.

Hamilton (1805-1865) asentó los fundamentos de la mecánica analítica hamiltoniana. Demostró que las trayectorias tanto en la óptica como en la mecánica, se pueden caracterizar mediante una función principal que cumplen con el mismo tipo de ecuación en derivadas parciales de primer orden, y que generalizada por Jacobi, fue la base para el desarrollo posterior de la mecánica cuántica por Schrödinger.

Sus métodos se aplicaron con éxito a la óptica geométrica para el diseño de lentes y la propagación de la luz en medios con índices de refracción variables.

Young (1773-1829), mediante experimentos de difracción e interferencias de la luz a través de rendijas, volvió a confirmar su naturaleza ondulatoria. Demostró que en realidad existen infinitos colores, y asignó correctamente su origen a longitudes de onda diferente.

Formuló una descripción fisiológica de la visión del ojo y una teoría de los colores.

Fresnel (1788-1827) interpreta la luz como una vibración que se propaga como ondas transversales en un medio elástico muy sutil, denominado éter luminoso, que

impregna todo el espacio y forma un marco de referencia absoluto. El concepto de onda transversal fue una importante aportación original de Fresnel.

Ampère (1775-1836), después de que Oersted descubriera que una aguja imantada se orientaba por una corriente eléctrica, intuyó que las corrientes eléctricas podían generar campos magnéticos. Esto le llevó a formular su ley de fuerzas entre dos elementos de corrientes –que asimiló a una fuerza de tipo newtoniana–, al ser directamente proporcional a las intensidades e inversamente proporcional al cuadrado de las distancias, aunque con una dependencia del ángulo de las corrientes.

Su teoría se basaba en la creencia de la existencia de los fluidos eléctricos y en que la electricidad era un estado especial de la fuerzas en un cuerpo cargado. Descubrió que una espira con una corriente constante era equivalente a un imán permanente, y consecuencia de ello fue su invento del electroimán.

Como newtoniano, negaba la realidad del magnetismo y consideraba que sólo existía la fuerza eléctrica, lo que le llevó a sugerir que el magnetismo se debía sólo a corrientes moleculares en la materia. Sin embargo, debido a que sus fuerzas no son newtonianas, supuso que las corrientes eléctricas generan una fricción cuando se mueven a través de un éter eléctrico, que es la causa de la interacción entre corrientes.

Seebeck (1770-1831), siguiendo las ideas de Oersted de la conversión de fuerzas, descubrió la termoelectricidad, al comprobar que se generaba una corriente eléctrica al calentar un lado de un anillo hecho de dos metales diferentes.

Faraday (1791-1867), basándose en las ideas de Oersted sobre los campos, creó el concepto de líneas de fuerza. Su carencia de formación en matemáticas le llevó a idear un método intuitivo de representar el campo magnético y eléctrico en el espacio. Rechazó el concepto newtoniano de acción a distancia, ya que suponía que violaba la continuidad de los cambios en el espacio y el tiempo. Para Faraday, el espacio estaba lleno de fuerzas circulares que actuaban por proximidad, lo que estaba en contra de ideas newtonianas vigentes de que las fuerzas no pueden existir por sí solas en el vacío. Para describir el electromagnetismo, desarrolló un concepto de interacción espacial local por proximidad mediante líneas de fuerza. Desechó también la idea newtoniana de átomos eléctricos y magnéticos.

Postuló la unidad de las fuerzas, y la idea de que éstas se podían convertir unas en otras. Su intuición le guió para descubrir que se puede generar electricidad a partir de un campo magnético variable y le llevó a formular el principio de inducción de Faraday, cuya consecuencia fueron los inventos de la dinamo y del motor inducción eléctrica, a partir de su experiencia de las rotaciones electromagnéticas.

Los significados del campo electromagnético

Indicó que la condición básica para la inducción era que un conductor cortara las líneas de fuerza, a las que dotó de una realidad sustancial. Esto le llevó a afirmar que la acción a distancia no tiene lugar instantáneamente y que para todo cuerpo en un campo se produce un cambio en su configuración de fuerzas.

Basándose en su teoría, predijo la autoinducción y fue también el descubridor de la constante dieléctrica, del paramagnetismo y del diamagnetismo, así como de la rotación del plano de polarización de la luz al pasar por un campo magnético, lo a predecir una relación local o de acción entre el magnetismo y la luz. Predijo también, que cuando la luz es colocada en un campo magnético cambia ligeramente de color, fenómeno conocido hoy como efecto Zeeman.

También halló el equivalente químico de la electricidad, enunciando que la disociación química es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa por una disolución. Igualmente, averiguó que el proceso fundamental que se producía en las baterías para la generación de corriente consistía en reacciones químicas.

Afirmaba que existía una unidad entre todas las fuerzas, cuya cantidad total es fija, e identificaba la materia con el concepto de fuerza, suponiendo que todas las interacciones se producen por contacto y no a distancia. Esta simetría de conservación le llevó a sus descubrimientos de la interrelación entre la electricidad y el magnetismo y a predecir, por ejemplo, que un dieléctrico que se mueve en un campo magnético se debe polarizar como demostró experimentalmente con posterioridad Rowland (1848-1901).

Partió de la idea de que la carga es una tensión a lo largo de las líneas de fuerza, que convergen en las partículas, y de que las fuerzas ejercidas siempre son tangentes a dichas líneas de fuerza. Suponía que las líneas de fuerza eran elásticas, por lo que se curvaban y se mantenían separadas debido a unas presiones que denominaba estado electrotónico. El magnetismo suponía, era una vibración del estado electrotónico que se producía al vibrar las líneas de fuerza transversalmente, y que este también era el origen de la luz. Afirmaba también que la repulsión de fuerzas no existe y sólo es debida a una atracción diferencial entre fuerzas.

Consideraba como reales las líneas de fuerza, y esta idea le llevo a la demostración de su famosa ley, de que la electricidad que se produce en un conductor eléctrico es proporcional al número de líneas magnéticas atravesadas.

Faraday manifestó que el espacio es como la materia en propiedades físicas, concebía todo el espacio lleno de líneas de fuerza, y desechó la existencia del éter. Fue el primero en concebir la posibilidad de la propagación de ondas en el vacío.

Su concepto elemental de campos de fuerzas y su transformación entre ellos, como algo diferente del espacio vacío, sería la base para el desarrollo posterior de las

teorías de Maxwell e Einstein. Sin embargo, hasta el presente todavía no se ha logrado la conversión directa de la fuerza gravitatoria en electromagnetismo. Llegó a manifestar que el mero espacio es magnético. Un siglo y medio después, de acuerdo con la teoría de la relatividad de Einstein, se demostró que el campo electromagnético se propaga en el vacío como si el espacio tuviera una permeabilidad magnética asociada a su distorsión.

Faraday es el ejemplo de que sin una teoría no se pueden hacer experimentos e interpretarlos de forma adecuada. Sus especulaciones metafísicas le condujeron a sus grandes descubrimientos y, si hoy en día suenan extrañas, es más bien por su terminología, ya que en su esencia están integradas en las modernas teorías de campos que se inició con las teorías de Leibniz.

Ohm (1789-1854) comprobó en experimentos con el electroscoipo que existía una relación constante entre lo que denominó fuerza electroscóica (diferencia de temperaturas) y la acción magnética (corriente), que denominó resistencia, dependiente sólo de la naturaleza del cable. Esta relación en su honor se denominó ley de Ohm, y hoy en día se expresa como que la caída de tensión es igual a la intensidad por la resistencia. Demostró también que la corriente galvánica y eléctrica era la misma.

Green (1793-1841) generalizó los trabajos de Laplace y Poisson e introdujo el término de potencial. El teorema de Green relaciona las distribuciones permitidas de carga de superficie y volumen con el campo en un sistema electrostático. Introdujo también las ecuaciones locales entre el campo magnético y la densidad de corriente. Formuló las ecuaciones locales en derivadas parciales para las leyes de Coulomb y de Ampère, pero no llegó a publicarlas por su carácter de acción a distancia instantánea.

Gauss (1777-1855) fue quien divulgó las ecuaciones locales de la electrostática en la forma que se conoce actualmente como ley de Gauss. Las teorías de Green y Gauss son las que conducirían a Helmholtz al concepto de energía y de su conservación.

Propuso una teoría mecánica alternativa, demostrando que el movimiento de un sistema de partículas se produce de forma que se minimice el cuadrado de las diferencias de las fuerzas externas y las fuerzas de inercia, que denominó principio de la mínima constricción. Posteriormente Hertz (1857-1894) reinterpretó geoméricamente este principio, demostrando que un sistema de partículas sometidas a constricciones, se mueven en el espacio de configuración de las coordenadas de posición, con la trayectoria mas recta posible de mínima curvatura que son las geodésicas, que se conoce con el principio del camino más recto posible, que fue precursor de la teoría general de la relatividad en la formulación de una mecánica sin fuerzas.

Los significados del campo electromagnético

Wheatstone (1802-1875) fue quien se dio cuenta de que la fuerza electroscópica de Ohm, en realidad, era la diferencia de potencial entre los polos de la batería.

Lenz (1804-1865) comprobó que las corrientes variables producen cambios en campo magnético que generan corrientes electromotrices que tiende a contrarrestar el campo que las produce. Introduce el concepto de acción magnética contigua rechazando la idea de acción a distancia instantánea.

Carnot (1796-1832) estableció el principio de la imposibilidad del movimiento perpetuo en la termodinámica, mediante una ilimitada fuerza de movimiento (actualmente energía cinética). Este principio fue generalizado por Helmholtz a toda la física.

Clausius (1822-1880) fue el primero que diferenció el primer principio de la termodinámica, o de la equivalencia del trabajo mecánico y del calor, del segundo principio del crecimiento de la entropía.

Weber (1804-1891) dio el primer tratamiento matemático que unificaba los resultados experimentales de la electricidad estática, la atracción de corrientes y la inducción, siguiendo un esquema mecanicista. Basándose en la ley de Ampère, desarrolló una teoría de fuerzas de interacción que se apartaba del esquema de fuerzas de Newton y Coulomb, proponiendo una mecánica basada en unas fuerzas no centrales que dependían de la velocidad y de la aceleración, que aplicó tratando de explicar la precisión del perihelio de la órbita de Mercurio.

Introdujo la idea de que las corrientes eran cargas en movimiento, y estimó un límite para la velocidad de las interacciones electromagnéticas que era un 40% superior a la velocidad de la luz.

Sus teorías crearon una escuela alternativa que se mantuvo hasta que Helmholtz demostró que su esquema de fuerzas violaba el principio de conservación de la energía, que solamente es compatible con las fuerzas centrales entre partículas. Sin embargo, las ideas de Weber de buscar una explicación mecanicista del electromagnetismo siempre han pervivido como una alternativa a las teorías de campos.

Fechner (1801-1887), argumentaba para explicar el efecto de Lenz, que las corrientes estaban formadas por corrientes positivas y negativas que se mueven en direcciones contrarias, y supuso que la inducción se debía a sus diferentes velocidades en conductores, estableciendo una conexión entre las leyes de Ampère y de Faraday. Sin embargo, para corrientes abiertas, su teoría discrepaba de la de Ampère que fue confirmada posteriormente como la correcta.

Maxwell (1831-1879), a diferencia de Faraday, consideraba la materia y el campo como entes diferentes, haciendo una distinción entre materia y fuerza. Mantuvo, en contra de Newton, la teoría de que un cuerpo actúa progresivamente sobre otro a través de un campo. Sin embargo, en su teoría suponía que las cargas se mueven en un campo, de acuerdo con las ecuaciones de Newton, con unas fuerzas que vienen dadas por las intensidades del campo en el punto en que se encuentran las cargas.

Debido a la continuidad de las funciones de campo en el espacio, su expresión es en forma de ecuaciones diferenciales. El concepto de campo también le permitió dividir la interacción electromagnética en dos partes separables más tratables matemáticamente, separando las fuentes y las interacciones. La energía de interacción también la formuló mediante ecuaciones locales.

Basándose en dichas ecuaciones, cuarenta años después de Fresnel, Maxwell demuestra que la luz está constituida por ciertas perturbaciones electromagnéticas que se propagan como ondas transversales, integrando los fenómenos electromagnéticos con la teoría ondulatoria de la luz.

Pero ni Maxwell ni sus continuadores abandonan su concepción mecánica de la naturaleza, y mantienen la existencia de un éter (luminífero) en el que se propaga el campo eléctrico y magnético, subordinado a las leyes de la mecánica de Newton. Maxwell describió los fenómenos electromagnéticos mediante ecuaciones locales de campos en un espacio y tiempo absolutos e independientes, y postuló que las interacciones electro-magnéticas se realizan a través de un tensor electromagnético de los campos, eliminando toda acción a distancia, que era un residuo de la mecánica newtoniana. El concepto de campo introducido por Maxwell es un ente independiente de que exista o no la presencia de materia sobre la que actúa.

Aunque anteriormente Laplace y Poisson utilizaron los campos para sus cálculos, los consideraron solamente un artificio matemático intermedio para el cálculo de las interacciones entre cargas que suponían instantáneas.

La velocidad finita de propagación de las interacciones es lo que dota al concepto de campo de Maxwell de una realidad. Posteriormente, **Lorentz** (1853-1928) y **Poincaré** (1854-1912) se dieron cuenta de que en las ecuaciones de Maxwell el espacio y el tiempo no cumplían con el principio de equivalencia de Galileo ante transformaciones entre sistemas que se mueven con velocidad uniforme entre ellos, pero no se percataron de la profundidad y el alcance universal de estas relaciones. Maxwell utilizó el principio de la conservación de la energía para interpretar la ley de Faraday, en su modelo mecanicista del electromagnetismo.

Los significados del campo electromagnético

Joule (1818-1889) descubrió la equivalencia entre trabajo mecánico y el calor, y también comprobó que el calor perdido en un circuito voltaico es proporcional al cuadrado de la intensidad de la corriente que circula.

Riemann (1826-1866) obtuvo la ecuación de ondas para los potenciales del campo electromagnético, estableciendo la conexión entre la óptica y la electricidad. También demostró que la fuerza electromagnética entre elementos conductores, no estaba dirigida siempre en la dirección que los une.

Kirchhoff (1824-1887) formuló la teoría de los potenciales en función de las corrientes estacionarias. También demostró que el espectro de radiación electromagnético de un cuerpo caliente (cuerpo negro) es independiente del material que lo constituye.

Helmholtz (1821-1894) fue quien primero enunció el principio general de la conservación de la energía, aunque realmente este término fue acuñado por Rankine. Los principios conservación de la energía mecánica ya se venían utilizando, y de ellos se valió Maxwell para su demostración mecánica de la ley de inducción electromagnética de Faraday. Sin embargo, la localización de la energía fue origen de controversias. En un principio, Maxwell supuso que la energía tenía una localización espacial definida y que era una alternativa a la idea de Faraday sobre la conservación de las fuerzas. Sin embargo, en la teoría de Maxwell así como en mecánica, la energía total de un sistema no tiene una magnitud direccional y es una función integral de las variables de campo, por lo que la energía no se puede asociar a ningún punto concreto del espacio y el principio de conservación de la energía sólo es una característica global de un sistema.

No fue hasta Einstein, quien estableció la equivalencia entre masa y energía, cuando se dotó a la energía de cierta sustancialidad.

Helmholtz sostenía la teoría de un éter constituido por partículas newtonianas. Basándose en una generalización de los potenciales, dio una formulación alternativa que modificaba las ecuaciones de Maxwell, introduciendo un parámetro ajustable dependiente de la polarización del vacío, que predecía ondas electromagnéticas tanto transversales como longitudinales. Fue su discípulo Hertz quien demostró experimentalmente que las ondas electromagnéticas eran transversales y que las ecuaciones de Maxwell eran las correctas.

Empleando su experiencia inicial como médico militar, desarrolló también las teorías fisiológicas de la visión de los colores, de la acústica y de la teoría de la música, basado en la sensación de los tonos.

Mach (1838-1916), representante de la escuela positivista o experimental radical, negaba el atomismo y las teorías de campos por no ser observables, y seguía manteniendo un modelo mecánico de la naturaleza, afirmando que en las teorías sólo deben figurar magnitudes directamente medibles. Formuló lo que se conoce como principio de Mach, que establece que las propiedades locales de inercia mecánica se deben a la distribución de la masa en el universo, lo que todavía hoy es objeto de disputa.

Lodge (1851-1940) generalizó el principio de la conservación de la energía del campo electromagnético y enunció el principio de la identidad de la energía que afirma que, para cualquier forma de energía, su trayectoria se puede seguir de forma continua a través de los distintos medios de transferencia, y que cuando se transfiere siempre se transforma en otra forma de energía.

Lodge desarrolló un proyecto de mecanización de la energía, de forma que tuviese una distribución localizada, y en los sistemas dinámicos se propagase mediante flujos de corrientes, lo que le llevó a formular el importante concepto físico del tensor de esfuerzos y de energía.

Lodge desarrolló también la telegrafía sin hilos y fue el primero en transmitir una señal de radio en 1894, un año antes que **Marconi**. Rebatía también la teoría del éter.

Poynting (1852-1914) extendió el concepto de flujo de energía, y demostró que si varía la energía eléctrica o magnética en una región, su cambio es igual al flujo de energía (actualmente conocido como vector de Poynting) a través de la superficie que encierra dicha región.

Hertz (1857-1894), siguiendo los principios de la física formal, toma las ecuaciones de Maxwell como algo dado a priori y postula que todos los fenómenos electromagnéticos tienen que ser explicados por deducción operativa de las ecuaciones de Maxwell. Demostró mediante experimentos de interferencia efectuados con ondas electromagnéticas, que estas tienen propiedades similares a las de la luz, y refutó todas las teorías de acción a distancia y del éter.

Fue también el descubridor del efecto fotoeléctrico.

Como antineutoniano, trató de formular una mecánica sin el concepto de fuerzas. Su principio geométrico del camino más recto posible en base al principio mecánico de la mínima constricción de Gauss, influyeron posteriormente en Einstein para la construcción de su teoría general de la relatividad, donde la fuerza de gravitación es sustituida por una deformación del espacio tiempo producido por los campos de la

Los significados del campo electromagnético

materia. Propuso también una velocidad de propagación finita para la interacción gravitatoria.

Sugirió también en su concepto de una mecánica sin fuerzas, que la energía potencial era el efecto cinético macroscópico debido al movimiento de variables ocultas microscópicas

Thomson J. J. (1856-1940) fue el primero en abordar el campo creado por cargas en movimiento, un problema importante que relacionaba la materia con el campo. En vez de los tubos magnéticos de Maxwell, consideró que eran más fundamentales los tubos de fuerza eléctrica.

El número y la dirección de éstos, por unidad de superficie ortogonal, indican la intensidad de la fuerza eléctrica sobre la superficie que, por el teorema de Gauss, está relacionada con la carga. Supuso que este teorema era aplicable tanto para cargas estáticas como para cargas en movimiento. A partir de ahí, demostró que el movimiento de los tubos eléctricos está relacionado con la fuerza magnética, cuya intensidad es proporcional al número y velocidad de los tubos que la atraviesan, y que su dirección es perpendicular al tubo de fuerza y a su velocidad de movimiento. El concepto de velocidad de los tubos es lo que le permitió establecer una conexión entre la corriente de desplazamiento y la de conducción, que permanecía sin explicar en la interpretación operativa de las ecuaciones de Maxwell. Una carga en movimiento arrastra los tubos de fuerza y su diámetro puede variar según la intensidad de la fuerza eléctrica. Según Thomson, la corriente de desplazamiento está relacionada con la variación del número de tubos que cortan una superficie, y la corriente de conducción está relacionada con la velocidad de los tubos a través de la superficie. Estas corrientes son la causa del campo magnético.

Descubrió los rayos catódicos demostrando que estaban constituidos por unas partículas de carga negativa que llamó inicialmente corpúsculos y que posteriormente se denominaron electrones.

Recibió el premio Nobel por su descubrimiento del electrón y por haber determinado experimentalmente la relación entre su carga y su masa.

Stoney (1826-1911) fue quien acuñó el término de electrón al postular que la electricidad era creada por unos corpúsculos elementales a los que llamó electrones.

Fitzgerald (1851-1903) fue el primero que demostró teóricamente que todas las corrientes alternas radiaban energía, pero fue Hertz quién se anticipó de forma independiente demostrando su existencia experimentalmente. De las relaciones de transformación de las ecuaciones de Maxwell, conjeturó que todo cuerpo en

movimiento se contrae en la dirección de su movimiento, anticipando una de las consecuencias de la teoría de la relatividad.

Planck (1858-1947) desarrolló su teoría del campo electromagnético a partir del principio de la conservación local de la energía y del principio de la acción contigua. Postuló que el intercambio de energía en cada punto del espacio sólo se produce con el medio de su entorno a través de un flujo de energía, y supuso que la variación de densidad de energía eléctrica por unidad de tiempo igual a la energía disipada por efecto Joule $\sigma \vec{E}^2$, obteniendo las mismas ecuaciones que Maxwell.

Tratando de reproducir teóricamente el espectro de radiación del cuerpo negro para altas frecuencias, a partir de un modelo de osciladores radiantes y de la termodinámica estadística de Boltzmann, descubrió que la energía electromagnética debía absorberse y emitirse en cuantos de energía múltiplos enteros frecuencia por una constante, que pasó denominar como la constante universal de Planck, abriendo las puertas de la mecánica cuántica.

Lorentz (1853-1928) completó la teoría de Maxwell con una teoría de la interacción del campo electromagnético con la materia cargada, lo que le permitió demostrar que las leyes de la reflexión y refracción son una consecuencia de la electrodinámica.

Empleó la notación vectorial desarrollada por **Heaviside** (1850-1925) para las ecuaciones de Maxwell, y le añadió al conjunto la fuerza de Lorentz, que relaciona la interacción del campo con las cargas en su teoría del electrón.

Fue el primero que indicó que la materia cargada se debe a un exceso o defecto de electrones, y consideró que las corrientes como un flujo de electrones, son la fuente del campo electromagnético y el origen de las interacciones electromagnéticas.

A partir de la teoría de los potenciales en función de las corrientes estacionarias de Kirchhoff, desarrolló la teoría de los potenciales retardados como solución general a las ecuaciones de Maxwell. Al tiempo de retardo $t - \frac{rv}{c^2}$, lo denominó tiempo local. Al resolver las ecuaciones de ondas con respecto al éter que consideraba fijo, descubrió las ecuaciones del electromagnetismo son invariantes ante las transformaciones relativistas de desplazamiento boost relativo

$$x' = \frac{(x - vt)}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad t' = \frac{\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

El experimento de Michelson lo interpretó como una contracción paralela al movimiento en un factor $\sqrt{1 - (v/c)^2}$, lo que fue sugerido también anteriormente por Fitzgerald.

Para Lorentz, estas transformaciones no tenían ningún significado físico y sólo eran artificios matemáticos para resolver las ecuaciones diferenciales.

Las transformaciones boost relativistas se conocen también como transformaciones de Lorentz, aunque fue Poincaré en un acto de generosidad quién les dio ese nombre, a pesar de ser quién se dio cuenta de su importancia física y matemática.

En la teoría que Lorentz elaboró sobre el electrón, asumió que las corrientes eran cargas en movimiento, como después demostraría experimentalmente Thomson. Con su formulación de la teoría de campos electromagnética, en su tiempo era posible explicar casi todos los fenómenos electromagnéticos y ópticos, excepto el efecto fotoeléctrico y la emisión de radiación de los cuerpos calientes (cuerpo negro), que serían posteriormente explicados mediante la teoría cuántica de la luz por Einstein.

Admitía la existencia del éter, y propuso a Michelson para su demostración medir experimentalmente la velocidad de la luz con diferentes direcciones de movimiento de la tierra.

24

Michelson (1852-1931), a sugerencia de Lorentz, demostró experimentalmente mediante interferencias de la luz, que no existe un sistema de referencia absoluto como el éter y que la velocidad de la luz es independiente del movimiento relativo uniforme. Este experimento fue la base de Einstein para abolir la teoría del éter y fundamentar la teoría de la relatividad. Este experimento fue realizado también de forma independiente por Morley, por lo que es conocido también como el experimento de Michelson y Morley.

Poincaré (1854-1912) se dio cuenta de la irrelevancia del éter mecánico de Lorentz y demostró que las ecuaciones de Maxwell son siempre invariantes ante estas transformaciones de Lorentz que forman un grupo, y sugirió que deberían aplicarse a todos fenómenos físicos. Sin embargo, sería Einstein quien se daría cuenta del significado físico profundo de estas transformaciones con relación al principio de causalidad, y las tomó como principio general de la física para fundamentar su teoría de la relatividad y, a partir de ahí, fundamentar su electrodinámica.

Actualmente se denomina grupo de Poincaré, al conjunto de las transformaciones boost de Lorentz, las rotaciones espaciales y la traslaciones espacial y temporal. Se conoce como principio de Poincaré, al postulado de todas las leyes de la física deben ser invariantes ante el grupo restringido de transformaciones de Poincaré.

Einstein (1879-1955) fue quien, basándose en los experimentos de Michelson, y la teoría electrodinámica del electrón de Lorentz y las observaciones de Poincaré, elaboró la teoría de la relatividad restringida, que fundamenta las ecuaciones de Maxwell, unificando el campo eléctrico con el magnético en una única identidad mediante un álgebra vectorial en un espacio de cuatro dimensiones ideada por **Minkowsky** (1864-1909).

Abolió las teorías del éter, y postuló que la velocidad de la luz era la misma en todos los sistemas inerciales que se mueven relativamente con una velocidad uniforme en base al resultado del experimento de Michelson, lo que le llevó a su teoría de la relatividad, en que el espacio y el tiempo ya no son independientes, y no existen sistemas de referencia absolutos. Para Einstein, no existe el espacio vacío sin campos. Las leyes de la física deben ser las intrínsecamente las mismas en todos los sistemas inerciales y no deben depender de la elección del sistema de coordenadas, por lo que es innecesario el concepto de espacio y tiempo absolutos. Preserva el principio de causalidad, a costa de abandonar el concepto de simultaneidad absoluta de la física clásica.

Su teoría de la relatividad conduce a que la velocidad de la luz es también la máxima velocidad máxima, tanto cinemáticamente, como a la que se puede transmitir la información.

Con su teoría del movimiento browniano, Einstein demostró la existencia de las moléculas, abriendo la vía del atomismo moderno.

También propuso la teoría del efecto fotoeléctrico, demostrando que la luz interacciona con la materia en corpúsculos discretos indivisibles, con energía y momento definidos pero sin masa, que se propagan a la velocidad de la luz, sentando las bases para la teoría cuántica.

Los experimentos realizados por **Compton** (1892-1962) al observar un cambio en la longitud de onda de la radiación electromagnética de alta energía al ser difundida por los electrones, confirmaron a su vez la teoría del fotón.

Todos estos resultados experimentales, reabrieron el debate de la doble naturaleza ondulatoria y corpuscular de la luz de que cuando se propaga lo hace en forma ondulatoria y, cuando interacciona con la materia, lo hace de forma corpuscular.

Este principio de complementariedad, que luego fue generalizado por **Bohr** (1885-1962), es una regla práctica que abrió una serie de debates sobre paradojas en mecánica cuántica. Ya anteriormente, Planck, para reproducir teóricamente el espectro de radiación del cuerpo negro, tuvo que cuantificar la energía electromagnética, pero fue Einstein quien se percató de sus implicaciones profundas. Basándose en la teoría de

Los significados del campo electromagnético

los cuantos de la luz calculó la relación que existe entre las probabilidades de emisión y absorción de radiación por los átomos en equilibrio termodinámico.

Paradójicamente, con posterioridad, ni Einstein ni Planck, aceptaron los postulados de interpretación de la mecánica cuántica que se desarrolló, y que ellos iniciaron.

Heisenberg (1901-1976), con sus principios de indeterminación, demostró que las variables dinámicas conjugadas no son independientes de las variables espaciales y temporales, y que la imagen de la doble naturaleza de la luz es contradictoria cuánticamente, ya que existen también unas relaciones de indeterminación entre las magnitudes del campo electromagnético. Esto le llevó a postular que el campo electromagnético que medimos macroscópicamente es, en realidad, un promedio estadístico de los campos asociados a los muchos fotones de luz, sentando las bases de la teoría cuántica de la radiación. En esta teoría, el espacio y el tiempo tienen la misma categoría, y la luz está totalmente cuantificada en fotones idénticos que se crean y destruyen en sus interacciones, por lo que su número no se conserva.

Heisenberg fue el fundador de la mecánica cuántica junto con **Schrödinger** (1887-1961). Heisenberg sostenía que una teoría sólo debe contener aquellos elementos que son medibles. A partir del espectro experimental de radiación atómico, elaboró una abstracta mecánica matricial. Schrödinger partió con una aproximación geométrica más visual de la ecuación mecánica de Hamilton-Jacobi, asociando a la materia una onda que debía cumplir su famosa ecuación de la mecánica ondulatoria.

De Broglie (1892-1987), con una tesis doctoral de cuatro páginas, anteriormente había invertido el razonamiento corpuscular de Einstein y postulado que toda partícula con momento lleva asociada también una onda. Experimentos posteriores con interferencias de electrones a través de rendijas, confirmaron esta hipótesis. Sin embargo, ni Schrödinger ni de Broglie llegaron nunca a aceptar la interpretación oficial de Copenhague de la mecánica cuántica dirigida por Bohr.

Dirac (1902-1984), con su teoría de la segunda cuantificación desarrolló un método para calcular de forma exacta las probabilidades de emisión y absorción de radiación por los átomos, que es la base de la teoría cuántica de la radiación, y determinó teóricamente el origen atómico del espectro de radiación del cuerpo negro. Parte de la idea de que la radiación está formada por partículas de fotones que se crean y destruyen en los procesos de absorción y de emisión en su interacción con los átomos.

Fundó también la teoría cuántica relativista, que le permitió demostrar la existencia del momento magnético del electrón y las partículas de antimateria. Sus teorías fueron la base para el desarrollo de la electrodinámica cuántica.

Feynman (1918-1988) es el creador de la electrodinámica cuántica, considerada la teoría más exacta que existe hasta el momento presente por su precisión en la predicción del momento magnético del electrón comprobado experimentalmente. Postula que todos los procesos electromagnéticos derivan de interacciones de absorción y emisión de fotones por los fermiones, que son las partículas de la familia de los electrones, para todas las posiciones del espacio y del tiempo. Los fotones se pueden encontrar en cada uno de los estados de polarización (X, Y, Z, T) , correspondientes al potencial vectorial y escalar. Cuando un fotón recorre una distancia grande, parece ir a la velocidad de la luz, y las amplitudes de los términos Z y T se cancelan. Pero, para fotones virtuales que van de un protón a un electrón en un átomo, la componente T es la más importante, y esto hace que la ley de Coulomb no sea sino un intercambio de momento a través de fotones virtuales entre partículas cargadas. Del acoplamiento de los electrones con los cuatro estados de los fotones surgen los potenciales electromagnéticos escalar y vectorial. Cuando los campos eléctrico y magnético varían con suficiente lentitud, la contribución más importante a la amplitud de probabilidad de los fotones y electrones proviene de los caminos predichos por la óptica geométrica y la mecánica de Newton. Esto hace que parezca que la luz, así como los electrones, sigan una línea recta en el vacío. En realidad, los fenómenos macroscópicos son producidos por interacciones entre electrones y fotones según la electrodinámica cuántica. Feynman demuestra que todas las propiedades del campo electromagnético de tipo Maxwell y, por tanto de la luz, pueden ser deducidas de su naturaleza corpuscular cuántica.

Interpretaciones históricas del campo electromagnético

Siempre ha existido una discusión sobre la interpretación de las ecuaciones de Maxwell y, en especial, sobre el significado del campo de inducción magnética $\vec{B}$ y el campo magnético $\vec{H}$. A continuación, resumiremos algunas de las principales interpretaciones que se han dado a lo largo de la historia sobre el electromagnetismo, independiente de los éxitos técnicos en su aplicación operacional.

Mallet-Favre (1740-1780) introdujo el concepto de intensidad magnética a partir del momento ejercido sobre cada elemento de un imán de prueba. No fue hasta el siglo XIX que se introdujo el concepto de campo magnético.

Poisson (1781-1840) fue quién calculó la intensidad magnética en el exterior de un cuerpo magnetizado a partir de la intensidad de magnetización en su interior. Para ello, empleó la técnica de pasar de un medio discreto de moléculas magnéticas a un medio idealizado continuo. Introdujo también el concepto del potencial magnético en magnetostática. Mediante transformaciones matemáticas, demostró que las fuerzas

magnéticas se asemejan a interacciones entre polos magnéticos y que la fuerza entre dos imanes homogéneos es equivalente a la interacción entre dos capas de monopolos en los extremos de cada imán. En el caso de imanes no homogéneos, existe una contribución debida a la divergencia de la magnetización. Al igual que en la polarización eléctrica, las contribuciones de superficie a los campos proviene de las transformaciones integrales de la divergencia de las fuentes.

Poisson distinguía entre la intensidad magnética en un punto, producida por una molécula magnética, de la creada en un pequeño volumen macroscópico alrededor de dicho punto, y de la producida por el resto del cuerpo magnetizado, pero abandonó todo intento de calcular la intensidad en el interior de los cuerpos magnetizados y se limitó al estudio en los puntos externos.

Mossoti (1791-1863) afirmaba que los resultados de las transformaciones integrales de Poisson tienen una realidad física en el caso eléctrico.

Gauss (1777-1855) definió la unidad de polo magnético, como la unidad de fuerza que ejerce sobre otro polo igual, sentando las bases de una definición formal de unidades magnéticas.

Green (1793-1841) definió la intensidad magnética como la intensidad experimentada por una pequeña esfera de prueba dentro del medio magnético.

W. Thomson (Lord Kelvin, 1824-1907) afirmaba que las transformaciones integrales son artificios matemáticos sin realidad física, aunque reproduzcan los efectos experimentales. Definió inicialmente la intensidad magnética como la fuerza resultante que existiría en el interior de una pequeña cavidad –una vez retirado el material– sobre un pequeño imán de prueba. Sin embargo, esta definición no determina los valores de forma unívoca. Mediante una transformación integral, comprobó que un circuito de corriente circular crea un campo exterior equivalente a una capa superficial dipolar magnética limitada por el circuito. Generalizando el resultado, concluyó que el campo externo es igual al producido por unas corrientes superficiales equivalentes tangenciales a la superficie de la magnetización, y a unas corrientes internas igual al rotacional de la magnetización para materiales no homogéneos.

Demostró que, dentro de pequeñas cavidades transversales a las líneas de magnetización, la intensidad magnética (actualmente $\vec{B}$) es igual a la que existe en el medio real. Para pequeños tubos o solenoides en la dirección de la magnetización, se obtiene una intensidad polar (actualmente $\vec{H}$) que es continua al atravesar la superficie de dichos tubos, y cuya divergencia es igual a la divergencia con signo negativo de la magnetización.

Para Thomson, $\vec{B}$ y $\vec{H}$ y son cualitativamente iguales en el vacío.

Actualmente, muchos autores todavía consideran que la definición de la intensidad magnética dentro de los materiales es un asunto sólo de convención, ya que no se puede expresar $\vec{B}$ como el promedio de los campos microscópicos si no se define previamente qué se entiende por campo macroscópico.

Tenía una concepción pura mecanicista del electromagnetismo basada en modelos y analogías mecánicas.

Maxwell (1831-1879), por la similitud de las ecuaciones del electromagnetismo que habían obtenido experimentalmente sus predecesores, desarrolló una analogía hidrodinámica con un modelo de fluidos en un medio resistivo. Consideró que la intensidad magnética era similar a un gradiente de presión, y la inducción magnética como el flujo resultante por unidad de área.

Éste es el origen de que aún, hoy en día, se considere a $\vec{H}$ como la causa de $\vec{B}$, a que se le interprete como una densidad de flujo, y de que a ambos se les considere todavía conceptualmente distintos y tengan diferentes unidades. $\vec{B}$ es una medida de la fuerza electromotriz inducida por unidad de longitud cuando un conductor corta las líneas de fuerza perpendicularmente, y es también la responsable de la fuerza sobre una corriente en un campo magnético. Posteriormente, Maxwell dio diferentes interpretaciones de $\vec{B}$ y $\vec{H}$, adoptando finalmente un principio operacional de las ecuaciones en cuanto a sus resultados y aplicaciones. Siempre mantuvo una postura ambivalente sobre si $\vec{B}$ y $\vec{H}$ eran diferentes en el vacío.

Maxwell formuló sus ecuaciones con los siguientes nombres:

$\vec{T} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	Corriente total
$\mu \vec{H} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A}$	Fuerza magnética
$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{T}$	Corriente eléctrica
$\vec{E} = \vec{v} \wedge \mu \vec{H} - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla} \phi$	Fuerza electromotriz
$\vec{E} = k \vec{D}$	Elasticidad eléctrica
$\vec{E} = r \vec{j}$	Resistencia eléctrica
$\rho - \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0$	Electricidad libre
$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0$	Continuidad de la carga

Los significados del campo electromagnético

Maxwell consideró que la fuerza magnética era debida a la presión originada por la fuerza centrífuga de unos remolinos en el éter, cuya masa y energía cinética dependen de la permeabilidad magnética del medio.

La rotación de los remolinos provoca el movimiento de las partículas eléctricas en contacto con ellos, lo que a su vez provoca otros remolinos originando así el campo magnético alrededor de un cable. Las rotaciones representan el campo magnético. La inducción electromagnética es un efecto que se produce debido al gradiente de presión ocasionado por la distinta velocidad de los remolinos. La deformación elástica de los remolinos al variar la corriente de un cable, según él, es lo que origina una onda de desplazamiento de las partículas eléctricas y un campo magnético variable.

La fuerza electromotriz se origina por la tensión que actúa sobre los engranajes de su sistema mecánico. La identificación de la velocidad de los remolinos con la intensidad magnética y el estado electrotónico con el momento de los remolinos fue la base de todas sus deducciones. Sin embargo, en su modelo no introduce la carga eléctrica y se soporta fundamentalmente sobre las corrientes. Para Maxwell las cargas eran similares a un fluido.

Aunque Maxwell siempre creyó que el electromagnetismo estaba subordinado a las leyes mecánicas de Newton, la dificultad de interpretación de las ecuaciones una vez obtenidas, junto a su éxito al aplicarlas a la teoría de la luz, le llevó a una utilización estrictamente operacional de las mismas. Para ello, consideró que las magnitudes electromagnéticas que aparecen en sus ecuaciones son fundamentales, y que el campo es una realidad independiente con origen causal de todas las fuerzas electromagnéticas locales sobre las cargas situadas en él.

A partir de ese momento consideró el campo magnético como una variable oculta gobernada por las corrientes eléctricas, dando una importancia principal al potencial magnético $\vec{A}$.

La separación entre electricidad (materia) y campos de Maxwell dejó abierto el debate de cómo se producía realmente la interacción entre ellos. Una teoría unificada de la materia y el campo sería desarrollada posteriormente a partir de principios variacionales y las ecuaciones de campo de Euler-Lagrange y, más recientemente, con la electrodinámica cuántica.

El programa operacional de Maxwell para explicar todos los fenómenos electromagnéticos macroscópicos a partir únicamente de sus ecuaciones culminó con éxito al demostrar que la luz estaba formada por ondas electromagnéticas transversales.

Consideró la materia y el éter como medios continuos con propiedades macroscópicas (rigidez dieléctrica, permitividad, conductividad, capacidad), evitando especulaciones sobre la constitución molecular de la materia.

Siempre creyó que la interpretación correcta de sus ecuaciones debía estar subordinada a las leyes de Newton, aunque rompió con el concepto de acción a distancia de Ampère y Weber. Sin embargo, fue el primero que construyó una teoría unificada de campos contrastable con la experimentación e independiente de las fuerzas newtonianas. Sin embargo, abandonó todo intento posterior de hacer una teoría microscópica de los fenómenos. Llegó incluso a esbozar una teoría lagrangiana del electromagnetismo.

Aunque la teoría de Maxwell se aplica a muchos fenómenos, no explicaba la reflexión y la refracción de la luz. Para la explicación de estos fenómenos se requiere adicionalmente una teoría de la interacción del electromagnetismo con la materia, que sería formulada más adelante por Lorentz.

Heaviside (1850-1925) creó la actual notación vectorial de las ecuaciones de Maxwell. Su abreviatura para el rotacional, gradiente y divergencia, las dotó de nuevos significados matemáticos y las hizo más comprensibles y fáciles de manejar.

Aunque su rotacional de es proporcional a las corrientes (incluida la de desplazamiento), la interpretación asociada a la vorticidad magnética perdió su significado original. La interpretación de las ecuaciones de Maxwell, aunque quedó indeterminada físicamente, daba los resultados correctos operacionalmente. Heaviside eliminó el potencial de las ecuaciones originales de Maxwell y las dotó de una cierta simetría relacionando sólo las fuerzas eléctricas y magnéticas con una expresión que denominó forma dúplex:

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{D} &= \rho \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= \sigma_m \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{H} &= \vec{j} \\ \vec{j} &= \vec{C} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \rho \vec{v} \\ -\vec{\nabla} \wedge \vec{E} &= \vec{G} \\ \vec{G} &= \vec{K} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \sigma_m \vec{\omega}\end{aligned}$$

Siendo $\vec{C} = \sigma_e \vec{E}$ la corriente de conducción, $\rho_e \vec{v}$ es la corriente de convección, que posteriormente Lorentz consideraría equivalentes, lo que se confirmaría con el descubrimiento del electrón por J. J. Thomson. Por razones de simetría añadió una

carga magnética σ_m , aunque los experimentos hasta ahora han demostrado que no existe y que siempre es $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$.

Desarrolló también el concepto de flujo de energía de forma independiente a Poynting, y formuló las ecuaciones electrodinámicas para los cuerpos en movimiento. También fue el primero que determinó la aceleración de una partícula cargada en función de su velocidad y de las intensidades del campo eléctrico y magnético, aunque ahora se conoce como la fuerza de Lorentz al integrarla en su teoría electrodinámica.

Heaviside, que era sobrino de **Wheatstone** (1802-1875), inventor de la telegrafía eléctrica, fue el fundador de la moderna teoría de circuitos, y sus descubrimientos hicieron posible el desarrollo de la telefonía de larga distancia, aunque lamentablemente para él no los patentó. Desarrolló nuestra actual notación para las impedancias, inductancia y una versión del cálculo operacional que se anticipa a la moderna teoría de distribuciones. Su mérito fue que no tenía una formación académica formal y, al ser un autodidacta, vivió apartado de la comunidad científica.

Hertz (1857-1894) sostuvo que bastaba con una magnitud del campo magnético para determinar unívocamente el estado electromagnético y, según Becker (1887-1955), hay que abandonar la distinción entre $\vec{E}$ y $\vec{D}$ (y entre $\vec{H}$ y $\vec{B}$) en el vacío, en contra de la interpretación ortodoxa de la escuela de Maxwell.

Sin embargo, todavía ahora en las comisiones electrotécnicas se vota mantener esta diferencia, y $\vec{H}$ se asocia con una circulación de línea, y $\vec{B}$ respecto a un flujo de área, escogiéndose diferentes unidades de medida, con $\vec{H}$ en amperios . metro, y $\vec{B}$ en Teslas. Sin embargo, no existe ninguna experiencia ni teoría que indique que en el vacío el campo $\vec{H}$ tenga una información diferente de $\vec{B}$.

Para otros investigadores, el que sea $\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j}$ independiente del medio en situaciones estacionarias, indica que $\vec{H}$ es una magnitud primaria y que $\vec{B}$ es un campo derivado. Sin embargo, otros investigadores indican que lo que es independiente del medio es el rotacional de $\vec{H}$, y no $\vec{H}$. Otro argumento que dan es que se trata de $\vec{H}$ lo que aparece en la ecuación de ondas y en el vector Poynting del flujo de energía. Sin embargo, en la ecuación de la densidad de energía, $\vec{B}$ y $\vec{H}$ tienen el mismo estatus, así como en las ecuaciones de Maxwell.

Lorentz (1853-1928) empleó la notación vectorial definida por Heaviside para formular las ecuaciones de Maxwell y le añadió al conjunto la fuerza de Lorentz

$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$, que define la interacción del campo con las cargas en movimiento, que había sido antes descubierta por Heaviside.

Afirmaba que en el vacío había un único campo eléctrico y magnético. Postuló que es el promedio en volumen de los campos microscópicos y que es el único campo verdadero en los medios materiales.

Considera a $\vec{H}$ un campo derivado $\vec{H} = \vec{B}/\mu_0 - \vec{M}$, donde $\vec{M}$ es la intensidad de magnetización.

Posteriormente, sostuvo que $\vec{H}$ era el promedio de microcampos. Adicionalmente, sostuvo la opinión de que un medio puede ser sustituido por unas densidades de corriente de volumen igual a $\vec{\nabla} \wedge \vec{M}$, y unas corrientes superficiales iguales a $\vec{M} \wedge \vec{n}$. Actualmente, sin embargo, la mayor parte de los investigadores consideran estas corrientes ficticias basándose en la teoría atómica, aunque macroscópicamente den los resultados correctos.

Lorentz también considera a $\vec{E}$ como un campo promedio de volumen del campo microscópico en los dieléctricos. Supone que las transformaciones vectoriales de Poisson son reales, de forma que en cualquier dieléctrico existen realmente una densidad de carga de volumen $-\vec{\nabla} \cdot \vec{P}$ y una densidad superficial de carga $\vec{P} \cdot \vec{n}$. Al vector de desplazamiento $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ lo estima sólo un artificio matemático.

Otros investigadores posteriores, sin embargo, consideran que estas cargas son ficticias, argumentando que las transformaciones de Poisson asimilan macroscópicamente un medio real polarizado a otro medio no polarizado equivalente, sustituido por dichas cargas ficticias.

Por tanto, según ellos, las transformaciones de Poisson alteran las propiedades electromagnéticas fundamentales del medio. En un medio sin cargas ni corrientes reales, en situaciones estacionarias, se puede escribir

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{M}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = -\vec{\nabla} \cdot \frac{\vec{P}}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{\nabla} \wedge \vec{M}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{D} = \vec{\nabla} \wedge \vec{P}$$

Sin embargo, estos investigadores consideran que las fuentes magnéticas como $-\vec{\nabla} \cdot \vec{M}$ son sólo relaciones matemáticas ficticias. Las transformaciones de Gauss

$$\oint \epsilon_0 \vec{E} \cdot d\vec{S} = - \oint \vec{P} \cdot d\vec{S}$$
$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{S} = - \oint \vec{M} \cdot d\vec{S}$$

producen también unas cargas superficiales negativas ficticias, que tienen un sentido matemático, pero cuya realidad física ha dado lugar a controversias sobre su interpretación. Un tratamiento riguroso de los campos necesita de un análisis mediante la mecánica cuántica.

Si $\vec{h}$ es el campo magnético microscópico, se verificará en un medio sin fuentes

$$\oint \vec{h} \cdot d\vec{S} = \oint \vec{B} \cdot d\vec{S}$$
$$\int \vec{h} \cdot d\vec{l} = \int \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

Existe, por tanto, una distinción entre promedios macroscópicos de línea, superficie y volumen, lo que indica que existe una diferencia entre la componente longitudinal y transversal del campo magnético a lo largo de las líneas de polarización y magnetización.

Algunos investigadores actuales indican que se debe definir el campo macroscópico como el campo promedio que experimenta una partícula atómica a altas velocidades a lo largo de su trayectoria.

Esta distinción entre componentes longitudinal y transversal de los campos con relación a las direcciones de polarización, lleva a que algunos autores propongan que las ecuaciones de Maxwell se escriban sólo en función de dichas componentes.

Actualmente las teorías de grupos, consideran que las leyes físicas son representaciones de determinadas estructuras de grupos. Por ejemplo, actualmente se considera al campo electromagnético como una representación del grupo restringido del grupo de Poincaré $SO(1,3)$ de un campo nulo de espín 1, o también como la localización del grupo $U(1)$ de la invarianza fase (gauge invarianza) de un campo complejo de una lagrangiana hermitiana.

Cuando en la actualidad aún subsisten varias teorías que compiten en la interpretación de los campos electromagnéticos a nivel macroscópico, indica que las ecuaciones de Maxwell no son una explicación completa de la naturaleza. Además, las ecuaciones de Maxwell dan resultados inconsistentes cuando se aplican al cálculo de la energía del campo producido por una carga puntual, o de su masa electromagnética, teniendo en cuenta los fenómenos de autointeracción.

A lo largo de la historia, se han propuesto muchas teorías para explicar el origen de las ecuaciones de Maxwell y de la teoría de la luz. Siempre subyacía la insatisfacción de esta doble naturaleza de la luz, mecánica corpuscular y ondulatoria. Se aplicaron muchas de las diferentes teorías mecánicas a la deducción de los campos de las ecuaciones de Maxwell y, como era de esperar de su doble naturaleza. Para algunos aspectos funcionaban correctamente e incluso ampliaban las predicciones de las propias ecuaciones de Maxwell. Sin embargo, la mayor parte de las veces no dejan de ser razonamientos un poco más refinados que los efectuados por el propio Maxwell en sus deducciones, en los que al final se transluce las propias limitaciones de su punto de partida.

Lorentz y Poincaré se dieron cuenta de las extrañas relaciones de transformación entre las variables del campo electromagnético, pero solamente cuando Einstein formuló una teoría física radicalmente distinta se entendió el origen de estas relaciones.

La electrodinámica clásica en su formulación covariante de Einstein, implica que las interacciones siempre son producidas por una fuente externa, y que obedecen a las transformaciones de grupo de Poincaré, además de ser paridad covariante.

Sin embargo, en la teoría cuántica la materia que se describe mediante ecuaciones de campo, las fuentes de las interacciones contienen acopladas al propio campo, por lo resulta en una electrodinámica cuyas ecuaciones no son lineales a diferencia de la teoría clásica. En la teoría cuántica de campos, además al cuantificar el campo de las interacciones producidas por el campo de las fuentes, se generan unas partículas cuánticas de intercambio del campo de mediación que producen la interacción, como es el caso de los fotones en el electromagnetismo.

Siempre es bueno tener teorías predictivas que expliquen aunque sea parcialmente los fenómenos. Pero hay que distinguir entre, teorías fenomenológicas que están limitadas por sus parámetros que se deben ajustar experimentalmente, y las teorías de primeros principios.

Las ecuaciones de Maxwell, en el vacío para bajas energías, constituyen una buena aproximación, y para los campos en materiales, es una teoría fenomenológica que simplifica enormemente los sucesos que ocurren a nivel microscópico. En este caso el campo electromagnético hay que interpretarlo como unos valores promedios cuando la densidad de fotones es suficientemente grande.

Sin embargo, si la densidad de fotones es muy baja, entran en juego fenómenos cuánticos y las ecuaciones de Maxwell dejan de tener validez, existiendo incluso unas incertidumbres en la medida de los valores del campo.

La constante dieléctrica y el índice de refracción dan una explicación simplificada de cómo, por ejemplo, se propaga la luz en un cristal. Sin embargo, la realidad es completamente distinta, y lo que sucede es que el campo electromagnético es absorbido por los electrones atómicos y vuelto a irradiar, y así sucesivamente a través de la materia. La interacción del campo electromagnético con la materia está gobernada por la teoría cuántica de la radiación y, solo cuando entran en juego densidades de energía suficientemente elevadas con números cuánticos o densidades de fotones grandes, es válido el principio de complementariedad del límite clásico y se pueden aplicar las aproximaciones mecanicistas cuasiclásticas.

La teoría de la electrodinámica cuántica reduce todas las leyes del electromagnetismo a la interacción entre fotones y electrones. Es la teoría más exacta comprobada experimentalmente que se ha construido, pero también es la más desconcertante filosóficamente.

Que una teoría sea isomorfa con la realidad, y tenga una buena concordancia con los resultados experimentales no significa que sea una interpretación exacta de la realidad. Sin embargo, conocer los límites de una teoría no siempre es fácil, y este desconocimiento ha sido el origen de muchos debates y controversias a lo largo de la historia. Faraday sigue siendo el ejemplo de que antes que aplicar una teoría matemática, es mucho mejor tener un concepto claro sobre lo que está pasando en el mundo natural. Todas las grandes teorías generales se iniciaron con el Siglo de las Luces. La historia de la luz tiene también sus sombras como las pasiones de los hombres que las elaboraron y la mayor parte de las veces, además, reflejan cómo ven e interpretan ellos mismos el mundo.